

张永超, 赵录怀, 王 昊, 等. 基于环境气体信息的 BP 神经网络苹果贮藏品质预测[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 194-198.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.027

基于环境气体信息的 BP 神经网络苹果贮藏品质预测

张永超¹, 赵录怀², 王 昊¹, 张宇航¹

(1. 西安交通大学城市学院, 陕西 西安 710018; 2. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对苹果贮藏品质预测复杂、精度低的问题, 设计了基于环境气体信息的 BP 神经网络苹果贮藏品质预测。首先分析了贮藏环境中温度、气体体积比与苹果理化特性指标的相关性, 再通过对苹果的贮藏温度、气体(氧气、二氧化碳)体积比和理化特性指标(硬度、可溶性固形物含量、总酸含量、水分含量)进行检测, 将 16 组温度和气体体积比数据作为 BP 神经网络的输入, 理化特性指标分别作为 BP 神经网络的输出, 对建立的 BP 神经网络进行训练。训练后用 5 组非训练样本进行试验验证, 结果表明用 BP 神经网络模型预测苹果贮藏品质的预测值与实测值相对误差在 5% 以下, 可以满足苹果贮藏品质预测的精度要求。

关键词: 苹果; 贮藏温度; 气体信息; 贮藏品质预测; BP 神经网络

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0194-05

Prediction of apple storage quality using BP neural network based on environmental gas information

ZHANG Yong-chao¹, ZHAO Lu-huai², WANG Hao¹, ZHANG Yu-hang¹

(1. City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem of complex and low accuracy of apple storage quality prediction, the BP neural network based on environmental gas information was designed. The correlation between temperature, gas volume ratio and physical and chemical properties of apple in storage environment was analyzed, and then the storage temperature, gas (oxygen, carbon dioxide) volume ratio and physical and chemical properties (hardness, soluble solid content, total acid content, moisture content) were measured. Sixteen groups of temperature and gas volume ratio data were used as the input of BP neural network, and the physical and chemical properties were used as the output of BP neural network to train the established BP neural network. After training, five groups of non-training samples were used to verify the results. The results showed that the relative error between the predicted value and the measured value of apple storage quality using BP neural network model was less than 5%, which could meet the accuracy requirements of apple storage quality prediction.

Key words: apple; storage temperature; gas information; storage quality prediction; BP neural network

苹果青脆多汁, 酸甜可口, 是人们喜爱的水果之一。随着生活水平的提高, 人们对苹果的品质要求越来越高。因此, 研究出方便、经济的苹果贮藏品质检测方法, 既能满足消费者的要求, 又能使苹果的加工质量

和出口等级提高, 使苹果的经济效益达到最大化。

针对苹果无损检测技术主要有电学检测^[1]、近红外技术检测^[2]和机械特性法^[3-4]等方法。电学检测是利用电学指标对苹果水心病果和好果进行识别, 近红外技术检测是利用可见光与热红外技术对苹果树测产, 机械特性法利用苹果机械特性指标预测苹果贮藏品质, 这些方法操作较为复杂, 且成本较高。文献[5]报道了利用苹果的香气对苹果低温贮

收稿日期: 2019-06-07

作者简介: 张永超(1977-), 男, 陕西西安人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为自动控制。(E-mail) 1310105926@qq.com

藏时间及品质的预测,文献[6]报道了不同贮藏温度对秦阳苹果采后生理的影响,文献[7]报道了苹果冰点温度贮藏品质及质构变化,文献[8]报道了苹果品质变化对温度的响应规律及贮藏寿命预测。本研究通过分析贮藏环境中温度以及 O_2 和 CO_2 体积比与苹果理化特性指标的相关性,建立 BP 神经网络预测模型对苹果贮藏品质进行预测。

1 模型参数选取及测定

1.1 模型参数选取

供试苹果为红富士苹果,每周取样 1 次,观察、测定苹果品质的变化,试验时间为 16 周。

呼吸作用是果蔬贮藏过程最主要的生理活动,果实的呼吸速率直接受温度的影响,当贮藏温度低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,呼吸跃变和呼吸速率受到抑制,苹果贮藏温度冰点一般为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,贮藏温度过低,轻则发生冷害,重则发生冻害^[9-11]。 O_2 和 CO_2 作为苹果呼吸速率表征的主要气体,可以反映苹果在贮藏过程中呼吸速率的变化。苹果中常用来反映呼吸速率的方程为 $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2816\text{ (kJ)}$, 方程表现了 O_2 与 CO_2 之间的转换关系,贮藏中 O_2 体积比和 CO_2 体积比对苹果的贮藏品质有影响^[12-16]。综上所述选用温度($0\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及 O_2 和 CO_2 体积比作为建立苹果品质预测模型的参数。

1.2 O_2 和 CO_2 体积比的测定

数据获取系统由传感器、信号调理电路、FPGA、显示器组成。传感器型号为 O2-A2 氧气传感器和型号为 GSS-COZIR 二氧化碳传感器,FPGA 用 Altera 公司 EP1C6Q240C8 cyclone 系列芯片 FPGA,电源电压 3.3 V ,最高工作频率 275 MHz ,LCD 采用 1602LCD 液晶显示器, O_2 和 CO_2 体积比测定系统结构如图 1 所示。

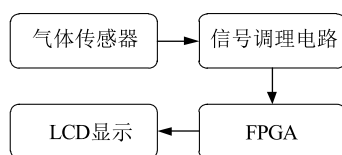


图1 O_2 和 CO_2 体积比测定系统结构框图

Fig.1 Structural block diagram of measuring system for O_2 and CO_2 concentration

选择大小一致、表面无病斑伤痕、成熟度 90% 以上的苹果,放入苹果存放专用箱中,每箱放 1 个苹

果,用厚度为 0.02 mm 的 PE 保鲜膜密封。将氧气传感器和二氧化碳传感器分别放入箱中,传感器的采集频率为 $1\text{ d } 10$ 次。每周进行 1 次测量,测量结果取 10 次测量值的平均值。

1.3 理化特性指标测定

测定理化特性参数硬度以及可溶性固形物、总酸和水分含量,测定方法依据国家标准 GB10651-1989。

2 BP 神经网络预测模型建立

2.1 BP 神经网络系统结构

BP 神经网络通常采用 3 层结构,增加各层的神经元数可以提高拟合精度。苹果品质检测模型选用 3 层结构:输入层、输出层和隐含层。将温度以及 O_2 和 CO_2 体积比作为输入,理化特性指标(硬度、可溶性固形物含量、总酸含量和水分含量)作为输出,试验的 BP 神经网络结构如图 2 所示。

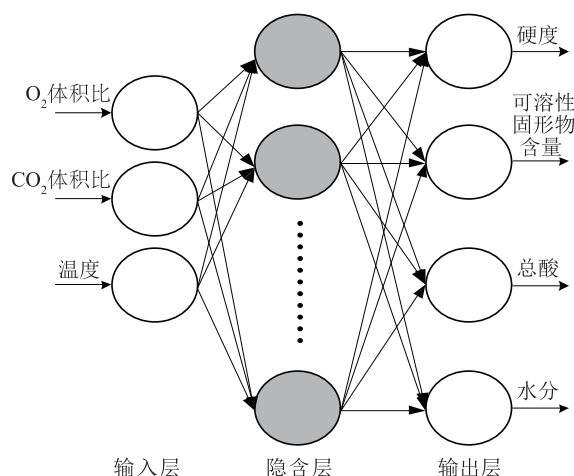


图2 BP 神经网络系统结构图

Fig.2 Structure diagram of BP neural network system

2.2 BP 神经网络隐含层节点数

隐含层节点数的确定公式为 $N = (n_1 + n_0)^{1/2} + a$, 式中 N 为隐含层节点数, n_1 为输出节点数, n_0 为输入节点数, a 为 1 至 10 之间的常数。本系统输入节点 $n_0 = 3$, 输出节点 $n_1 = 4$, 经计算 $N = 10$ 。

2.3 BP 神经网络传递函数

BP 神经网络隐含层采用 Tansig 作为传递函数,即 $f(x) = \tanh(x)$ 。输出层采用 Purelin 传递函数,即 $f(x) = kx$ 。

2.4 BP 神经网络模型建立

通过对苹果贮藏过程中温度以及 O_2 和 CO_2 体积比的检测,建立苹果贮藏品质预测模型,进而实现对苹果品质变化的预测。首先定义网络的输入输出样本,然后建立 BP 神经网络进行训练和仿真,直至达到设定的误差 5%,最终通过 5 组验证数据对所建立的模型进行验证。用 MATLAB 软件建立 BP 神经网络预测模型,使用 Newff 函数对网络进行初始化。模型参数设定为:训练步数 1 000,网络性能目标误差 1×10^{-5} ,学习率 0.5。

3 仿真结果及分析

本试验测量数据有 16 组训练数据、9 组测试数据、5 组验证数据。用苹果的贮藏温度和气体浓度作为输入,分别预测 4 个理化特性指标,最后用 5 组验证数据进行试验验证。

3.1 试验验证苹果硬度相对误差

对 9 组试验数据进行 BP 神经网络测试,温度以及 O_2 和 CO_2 体积比为 BP 神经网络的输入,硬度为 BP 神经网络的输出,对建立的 BP 神经网络预测模型进行测试。由图 3 可知,预测硬度的相对误差最大为 2.8%,预测效果较好,能够满足苹果硬度的预测要求。

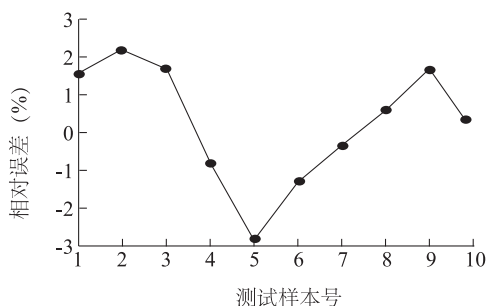


图 3 BP 神经网络训练时苹果硬度相对误差曲线

Fig.3 Relative error curve of apple hardness in the training of BP neural network

对训练的 BP 神经网络进行验证。用 5 组非训练样本数据输入所建立的 BP 神经网络预测模型预测出硬度,并与实际测试值对比,计算 BP 神经网络预测的相对误差。结果(表 1)表明,预测值与实测值的最小相对误差为 1.6%,最大相对误差为 3.2%。说明 BP 神经网络预测性能较好,可以满足苹果硬度预测的精度要求。

3.2 试验验证苹果可溶性固形物含量相对误差

对 9 组试验数据进行 BP 神经网络测试,温度以

及 O_2 和 CO_2 体积比为 BP 神经网络的输入,可溶性固形物含量为 BP 神经网络的输出,对建立的 BP 神经网络预测模型进行测试。由图 4 可知,预测可溶性固形物含量的相对误差最大为 2.7%,预测效果较好,能够满足苹果可溶性固形物含量的预测要求。

表 1 苹果硬度预测值与实测值相对误差

Table 1 Relative error between predicted hardness and measured hardness of apple

温度 ($^{\circ}C$)	O_2 体积比 (%)	CO_2 体积比 (%)	硬度 预测值 ($\times 10^5$ Pa)	硬度 实测值 ($\times 10^5$ Pa)	相对 误差 (%)
0	20.86	0.03	12.76	13.00	1.8
0	20.54	0.07	12.12	12.44	2.6
0	20.32	0.10	11.48	11.86	3.2
0	19.98	0.27	11.92	11.61	2.7
0	19.20	0.34	10.93	10.76	1.6

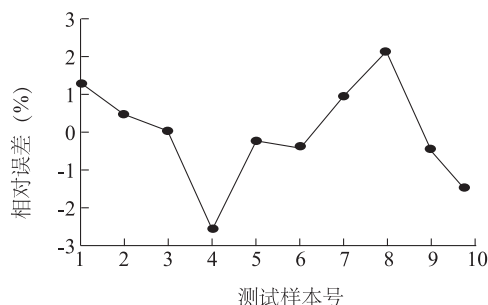


图 4 BP 神经网络训练时苹果可溶性固形物含量相对误差曲线

Fig.4 Relative error curve of apple soluble solid content in the training of BP neural network

对训练的 BP 神经网络进行验证,用 5 组非训练样本数据输入所建立的 BP 神经网络预测模型预测可溶性固形物含量。与实际测试值对比,计算 BP 神经网络预测的相对误差,可溶性固形物含量预测值与实测值相对误差如表 2 所示。从表 2 可知,预测值与实测值的最小相对误差为 2.3%,最大相对误差为 4.6%,表明该神经网络预测性能较好,可以满足苹果可溶性固形物含量预测的精度要求。

3.3 试验验证苹果总酸含量相对误差

对 9 组试验数据进行 BP 神经网络测试。温度以及 O_2 和 CO_2 体积比为 BP 神经网络的输入,总酸含量为 BP 神经网络的输出,对建立的 BP 神经网络预测模型进行测试。如图 5 可知,预测总酸含量的相对误差最大为 3.2%,预测效果较好,能够满足苹果总酸含量的预测要求。

表 2 苹果可溶性固形物含量预测值与实测值相对误差

Table 2 Relative errors between predicted and measured apple soluble solid content

温度 (℃)	O ₂ 体积比 (%)	CO ₂ 体积比 (%)	可溶性固 形物含量 预测值 (%)	可溶性固 形物含量 实测值 (%)	相对 误差 (%)
0	20.86	0.03	12.67	12.39	2.3
0	20.54	0.07	13.37	12.90	3.7
0	20.32	0.10	12.20	12.78	4.6
0	19.98	0.27	13.12	13.59	3.4
0	19.20	0.34	14.24	13.80	3.2

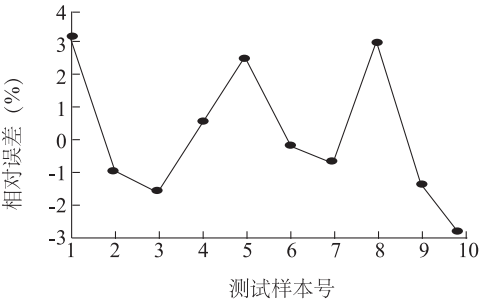


图 5 BP 神经网络训练时苹果总酸含量相对误差曲线
Fig.5 Relative error curve of apple total acid content in the training of BP neural network

对训练的 BP 神经网络进行验证。用 5 组非训练样本数据输入所建立的 BP 神经网络预测模型预测总酸含量,与实际测试值对比,计算 BP 神经网络预测的相对误差,结果如表 3 所示。从表 3 可知,预测值与实测值的最小相对误差为 1.9%,最大相对误差为 3.5%,表明 BP 神经网络预测性能较好,可以满足苹果总酸含量预测的精度要求。

表 3 苹果总酸含量预测值与实测值相对误差
Table 3 Relative errors between predicted and measured total acid contents of apple

温度 (℃)	O ₂ 体积比 (%)	CO ₂ 体积比 (%)	总酸含量 预测值 (%)	总酸含量 实测值 (%)	相对 误差 (%)
0	20.86	0.03	0.297	0.291	1.9
0	20.54	0.07	0.292	0.286	2.4
0	20.32	0.10	0.267	0.274	2.6
0	19.98	0.27	0.251	0.260	3.5
0	19.20	0.34	0.243	0.251	3.1

3.4 试验验证苹果水分含量相对误差

对 9 组试验数据进行 BP 神经网络测试。温度以及 O₂和 CO₂体积比为 BP 神经网络的输入,水分含量为 BP 神经网络的输出,对建立的 BP 神经网络预测模型进行测试。由图 6 可知,预测水分含量的相对误差最大为 0.17%,预测效果较好,能够满足苹果水分含量的预测要求。

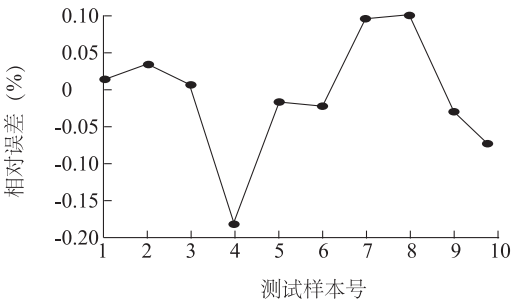


图 6 BP 神经网络训练时苹果水分含量相对误差曲线
Fig.6 Relative error curve of apple water content in the training of BP neural network

对训练的 BP 神经网络进行验证。用 5 组非训练样本数据输入所建立的 BP 神经网络预测模型预测水分含量,与实际测试值对比,计算 BP 神经网络的相对误差。从表 4 可知,预测值与实测值的最小相对误差为 2.1%,最大相对误差为 4.2%,表明 BP 神经网络预测性能较好,可以满足苹果水分含量预测的精度要求。

表 4 苹果水分含量预测值与实测值相对误差
Table 4 Relative errors between predicted and measured apple water content

温度 (℃)	O ₂ 体积比 (%)	CO ₂ 体积比 (%)	水分含量 预测值 (%)	水分含量 实测值 (%)	相对 误差 (%)
0	20.86	0.03	87.89	85.66	2.6
0	20.54	0.07	82.33	85.32	3.5
0	20.32	0.10	88.41	85.17	3.8
0	19.98	0.27	86.82	85.03	2.1
0	19.20	0.34	88.48	84.91	4.2

用苹果贮藏温度、气体体积比预测苹果贮藏品质的试验验证结果表明,预测值与实测值的最小相对误差为 1.6%,最大相对误差为 4.6%,相对误差在 5%以下,满足苹果贮藏品质预测精度的要求。

4 结 论

基于 BP 神经网络,用苹果贮藏温度和气体体积比建立苹果贮藏品质的预测模型。将贮藏温度和气体体积比作为输入,理化特性指标作为输出,用 16 组样本数据训练 BP 神经网络,得到 BP 神经网络预测模型。用 5 组非训练样本数据进行试验验证,结果表明预测值与实测值的相对误差在 5% 以下,可以满足苹果贮藏品质预测精度的要求。

参考文献:

- [1] 王若琳,王 栋,任小林,等. 基于电学特征的苹果水心病无损检测[J].农业工程学报,2018,34(5):129-136.
- [2] 宗 泽,郭彩玲,刘 刚. 基于可见光与热红外技术的苹果树测产方法[J].农业工程,2017,7(6):77-82.
- [3] 李小昱,王 为. 基于灰色系统理论用机械特性指标预测苹果贮藏品质特性[J].农业工程学报,2005,21(2):1-6.
- [4] 汪小芳. 基于人工神经网络利用机械特性检测苹果品质方法的研究[D].武汉:华中农业大学,2003.
- [5] 李 莹,任亚梅,张 爽,等. 基于电子鼻的苹果低温贮藏时间及品质预测[J].西北农林科技大学学报,2015,43(5):183-191.
- [6] 高 华,鲁玉妙,王雷存,等. 不同贮藏温度对秦阳苹果采后生理的影响[J].华北农学报,2010,25(增刊):154-156.
- [7] 徐艳艳. 苹果冰点温度贮藏品质及质构变化研究[D].福州:福建农林大学,2014.
- [8] 史卫娜. 苹果品质变化对温度的响应规律及贮藏寿命预测[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [9] 尹 航. 高 CO₂ 对鸭梨果心褐变的促进作用及机理[D].石家庄:河北科技大学,2014.
- [10] 刘 萌,郭风军,王美兰,等. 蓝莓呼吸速率的测定及模型表征[J].食品研究与开发,2013,34(14):10-13.
- [11] 曹冬洁,王相友,王 娟,等. 基于酶动力学方程的双孢蘑菇气调贮藏呼吸速率模型[J].农业工程学报,2016,32(4):284-289.
- [12] 王文辉,徐步前. 果品采后处理及贮运保鲜[M].北京:金盾出版社,2003:123-141.
- [13] 冯建华. 苹果贮藏保鲜问题分析[J].农产品加工,2011(9):7-8.
- [14] 周会玲,朱林生,任小林,等. 陕西省苹果贮藏保鲜业存在的问题与发展对策[J].北方园艺,2011(12):163-165.
- [15] 南晓红,胡磊洋. 苹果冷库气体环境影响因素及通风调控策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [16] 胡花丽,叶小平,李鹏霞,等. 乙烯和 CO₂ 气体吸收剂对采后小包装丰水梨货架期品质的影响[J].江苏农业学报,2017,33(1):191-196.

(责任编辑:张震林)